

Návrh tlumivky akumulárního vzestupného měniče

ing. Josef Jansa

Tento příspěvek přináší výsledky měření účinnosti akumulárního vzestupného měniče v závislosti na parametrech použité pracovní tlumivky.

Úvod

Cílem dále popsaných experimentů bylo v konkrétním, prakticky použitelném zapojení spínaného zdroje potvrdit závěry vyplývající z laboratorního měření kovových práškových jader [1].

Zapojení měniče

Pro svoji jednoduchost a snadnou nastavitelnost potřebných parametrů byl zvolen akumulární vzestupný měnič v zapojení podle obr. 1. Časovač IO je v něm zdrojem obdélníkových impulsů, které budí přímo spínací tranzistor T. Stěžejním prvkem zapojení je pro nás z výše uvedených důvodů akumulární (pracovní) tlumivka L_1 , kterou protéká trojúhelníkový proud, zatímco na ní indukované napětí má průběh pravouhlý.

Kombinace diod a odporů mezi vývody 6 a 7 časovače je známé zapojení, které umožňuje potenciometrem R_3 měnit střídu impulsů (a tím i velikost výstupního napětí měniče) v rozmezí téměř od 0 % do 100 %, aniž by se významněji měnil opakovací kmitočet. Toto zapojení bylo zvoleno proto, že konstantní kmitočet velmi usnadňuje matematickou simulaci funkce tlumivky.

Kmitočet měniče, který lze kapacitou C_4 nastavit ve značném rozsahu, byl zvolen 70 kHz, tedy v oblasti, v níž lze sice ještě používat běžná železoprachová jádra, avšak v níž by již měl být zřejmý přínos kvalitních jader slitinových.

Tlumivka L_2 spolu s kondenzátory C_6 až C_9 vyhlazují výstupní napětí, zatímco průniku střídavého rušení do zdroje napájecího napětí zabraňují filtrační kondenzátory C_1 až C_3 . Volba hodnot prvků obou filtrů byla přitom vedena potřebou dosažení velmi malého zvlnění obou napětí – jediné tak lze při dále popsaném měření účinnosti měniče dosáhnout potřebnou přesnost.

Měření účinnosti

Ve snaze vyhnout se nutnosti současného použití několika velmi přesných měřicích přístrojů bylo zvoleno měření účinnosti měniče podle obr. 2. V něm postačuje pouze jediný přesný voltmetr, jehož jedna vstupní svorka je střídavě připojována ke třem měřicím bodům, zatímco druhá vstupní svorka je trvale spojena se zemí měniče.

V pozici V_S je voltmetr připojen ke snímacímu rezistoru R_S , napětí na němž je přímo úměrné vstupnímu proudu měniče I_1 . Na místě R_S byl použit přesný měřicí bočník s odporem 0,1 Ω , který se ani při maximálním vstupním proudu (cca 4 A) ztelně neohřival.

V pozici V_1 je voltmetr připojen ke vstupu měniče a měří tak jeho vstupní napětí U_1 . Součin $U_1 \cdot I_1$ potom udává příkon měniče P_1 .

V pozici V_2 je voltmetr připojen k výstupu měniče a měří jeho výstupní napětí U_2 . Toto napětí spolu s velikostí zatěžovacího odporu R_Z umožňuje stanovit výstupní výkon měniče $P_2 = U_2^2 / R_Z$. Jako zatěžovací odpor byla použita přepínatelná paralelní kombinace většího počtu přesných miniaturních odporů 1 k Ω , chlazených vodou.

Pro celkovou procentuální účinnost měniče lze odvodit vztah :

$$\xi = 100 * \frac{U_2^2}{U_1 * U_s} * \frac{R_s}{R_z}$$

Jako voltmetr je optimální použít přesný digitální přístroj s automatickou volbou rozsahů, neboť odečtení sady tří měřených napětí by mělo proběhnout vždy v co nejtěsnějším sledu. Se stoupající výkonovou úrovní totiž může docházet k ohřevu některých součástí (zejména T a L₁, popř. též R_z, R_s, D₃ a L₂) a tím k „ujíždění“ měřených hodnot v čase.

Veškerá měření byla provedena při vstupním napětí 12 V a výstupním napětí 30 V, tedy napětích typických např. pro měnič výkonového nf zesilovače v automobilu.

Program pro návrh tlumivky

Pro návrh tlumivky byl sestaven jednoduchý program *Tlumivka*, který je volně ke stažení na [2], odkaz *Literatura*. Tento program po zadání požadovaných vstupních a výstupních parametrů měniče vypočítá potřebnou střihu impulsů budících spínací tranzistor a parametry nutné pro základní návrh tlumivky – tedy její indukčnost, proud a rovněž magnetickou energii, kterou musí být schopna akumulovat.

Na základě těchto výsledků je již možno tlumivku vcelku spolehlivě navrhnout. Program však navíc umožní po zadání základních parametrů navržené (popř. realizované) tlumivky stanovit rovněž hodnoty magnetických veličin v jejím jádře a dává tak možnost tento návrh případně optimalizovat.

Program je samozřejmě použitelný i pro jiná, principiálně stejná zapojení měniče.

Příklad návrhu 1

Požadujeme měnič s výstupním proudem 0,6 A (zátěž 50 Ω, výkon 18 W) a zvlněním proudu tlumivkou 0,3 A, tedy zvlněním relativně malým, se kterým nebude mít výstupní filtr příliš mnoho „práce“. Program vypočítá potřebnou indukčnost asi 330 μH, maximální proud tlumivkou 1,8 A, efektivní proud tlumivkou 1,7 A a akumulovanou magnetickou energii 550 μJ.

Zadání vyhovuje běžné žlutobílé železoprachové jádro průměru 20 mm (typ T80-26 s relativní permeabilitou 75), ovinuté 88 závitů. S ohledem na proud jako dostačující zvolíme drát průměru 0,4 mm. Výsledný stejnosměrný odpor takto realizované tlumivky bude asi 0,29 Ω a měnič s ní bude pracovat s účinností kolem 75 %, tedy pravděpodobně k naší naprosté spokojenosti.

Pokud nám však parametry měniče nedají spát, můžeme postoupit o krůček dále. Zadáme do programu stejnosměrný odpor realizované tlumivky a zjistíme, že ztráty na odporu vinutí činí asi 0,8 W. Je to málo či hodně?

Abychom to zjistili, pokusíme se odhadnout druhou složku ztrát tlumivky, a to tzv. wattové ztráty v jádře. Po vložení dalších parametrů tlumivky (počtu závitů, permeability jádra a jeho efektivní délky, v tomto případě 51,4 mm) nám program prozradí, že jádro tlumivky pracuje v oblasti indukce zhruba 0,27 T se zdvihem asi 48 mT. (Tento výpočet je pouze orientační, protože předpokládá lineární vztah mezi B a H; pro daný účel však naprosto postačuje).

Se znalostí materiálu jádra, pracovní frekvence a zdvihu indukce jsme již schopni odhadnout ztráty v jádře. Použijeme k tomu obr. 6 z [1], platný pro indukci 50 mT, z něhož odečteme měrné výkonové ztráty materiálu typu 26 při kmitočtu 70 kHz - asi 600 mW/cm³. Protože má použité jádro objem 1,19 cm³ a je buzeno indukcí jen jedné polarity, vychází wattové ztráty v jádře cca 0,36 W.

Je tedy zřejmé, že ztráty v jádře jsou zhruba poloviční oproti ztrátám v mědi a že materiál jádra se na celkových ztrátách tlumivky podílí pouhou jednou třetinou. Situace bude ještě markantnější, budeme-li při jinak nezměněném zadání požadovat výstupní proud měniče 1,2 A (zátěž 25 Ω, výkon 36 W). Pracovní bod jádra se nyní posune do oblasti indukce kolem 0,54 T, avšak zdvih indukce a tedy i ztráty v jádře se prakticky nezmění. Ztráty v mědi ovšem vzrostou na čtyřnásobek, což znamená, že budou činit již asi 90 % celkových ztrát tlumivky.

Je evidentní, že případná volba kvalitnějšího jádra nepřinese při jinak nezměněných parametrech tlumivky žádné významné zlepšení jejích ztrát a tedy zvýšení účinnosti měniče, neboť výrazně převažující vliv má odpor vinutí. Cestou ke zlepšení parametrů měniče bude při daném zadání zejména snížení odporu vinutí, tedy obvykle volba většího jádra a/nebo silnějšího vodiče.

Výsledky měření 1

Pro potvrzení těchto teoretických závěrů bylo realizováno několik různých tlumivek indukčnosti 330 μH , a to na železoprachových a KOOL M μ jádrech různé velikosti. Výsledky měření účinnosti měniče při výstupním proudu 1,2 A s těmito tlumivkami jsou zachyceny v obr. 3 (kulaté body v pravé části grafu - společná legenda viz obr. 6), v němž je nezávislým parametrem stejnosměrný odpor vinutí.

Je zřejmá jednoznačná závislost účinnosti měniče na odporu vinutí, zatímco vliv jádra není příliš zřetelný. Dobře to dokazuje např. skupina tří tlumivek s odporem kolem 250-260 $\text{m}\Omega$ ve středu grafu, s nimiž měnič dosahuje prakticky stejnou účinnost 76 % bez ohledu na velikost či materiál jádra.

Příklad návrhu 2

Smíříme-li se s větším zvlněním proudu tlumivkou a tím i s větším zvlněním výstupního napětí měniče, můžeme volit menší indukčnost a tedy při použití stejných jader i menší odpor vinutí. Zvolíme-li např. zvlnění proudu 1,5 A, vychází potřebná indukčnost asi 70 μH . S výše uvedeným železoprachovým jádrem průměru 20 mm ji lze realizovat např. jako 40 závitů drátem 0,71 mm, přičemž odpor vinutí bude asi 42 $\text{m}\Omega$.

Podrobná analýza takové tlumivky programem *Tlumivka* ukáže, že i při výstupním proudu měniče 1,2 A budou činit ztráty v mědi pouze asi čtvrtinu celkových ztrát tlumivky. Protože zbylé tři čtvrtiny ztrát nyní připadají na vlastní jádro, lze na rozdíl od předchozího návrhu oprávněně očekávat zřetelný přínos použití kvalitnějších jader.

Výsledky měření 2

Podobně jako v předchozím případě byla realizována řada tlumivek indukčnosti 70 μH na obou typech jader. Výsledky měření účinnosti měniče s nimi, provedené samozřejmě za stejných podmínek, zobrazují trojúhelníkové body v levé části obr. 3.

Je zřejmé, že účinnost stoupla v průměru o několik procent a že např. tlumivka s jádrem KOOL M μ velikosti 12 mm a odporem vinutí 55 $\text{m}\Omega$ má menší ztráty než rozměrově podstatně větší železoprachová tlumivka (jádro 20 mm) s menším odporem (42 $\text{m}\Omega$) - neplatí již tedy jednoznačná závislost účinnosti na odporu vinutí.

Celkové ztráty tlumivky

Je dobře patrné, že obě skupiny tlumivek, tedy indukčnosti 70 μH a 330 μH , vytvořily v obr. 3 zřetelně oddělené, vzájemně „nemísitelné“ skupiny. Podívejme se však na výsledky měření nikoliv pouze z hlediska stejnosměrného odporu vinutí, ale z hlediska celkových ztrát v tlumivce.

Extrapolace výsledků měření obou skupin dovoluje usoudit, že by se účinnost měniče v případě nulového odporu vinutí tlumivky pohybovala někde okolo 85 %. Pomineme-li na okamžik ztráty v jádře, můžeme si jistě dovolit učinit předpoklad, že měnič s ideální bezztrátovou tlumivkou bude mít účinnost právě někde v této oblasti. Známe-li však účinnost měniče s ideální tlumivkou a účinnost téhož měniče s tlumivkou reálnou, lze snadno určit i skutečné celkové ztráty, které v reálné tlumivce vznikají.

V ideálním případě by se takto stanovené celkové ztráty měly rovnat ztrátám, získaným z teoretické analýzy programem *Tlumivka*. A skutečně - ukázalo se, že rozdíl mezi oběmi hodnotami je překvapivě malý a navíc prakticky zmizí, pokud by skutečná efektivní hodnota proudu tlumivkou byla o asi 18 % větší než hodnota stanovená teoreticky. (Vzhledem k tomu, že proud tlumivkou má poměrně složitý tvar, jehož efektivní hodnotu je velmi nesnadné exaktně změřit a neméně nesnadné přesně vypočítat, je zmíněná odchylka nepochybně akceptovatelná).

Za tohoto předpokladu, tedy po korekci výpočtem předpovězené efektivní hodnoty proudu o +18 %, byl získán graf na obr. 4, který znázorňuje vztah mezi teoreticky stanovenými celkovými ztrátami tlumivek a skutečně naměřenou účinností měniče.

Jak vidno, obě skupiny tlumivek se hladce „spojily“ a naměřené výsledky lze bez ohledu na indukčnost tlumivky, odpor vinutí, velikost jádra či jeho materiál velmi dobře proložit jedinou interpolační přímkou. (Tato „přímkovost“ je důkazem správnosti jak provedených měření, tak i teoretické analýzy - byť se zmíněnou malou korekcí).

Průsečík interpolační přímkou s osou Y v obr. 4 udává nyní již upřesněnou hodnotu účinnosti měniče s ideální tlumivkou, konkrétně 85,3 %. Na základě této referenční hodnoty je možno výsledky z obr. 4 transformovat do obr. 5, který znázorňuje vztah mezi teoreticky stanovenými a skutečně naměřenými celkovými ztrátami tlumivek.

Tento graf, který je nejužitečným výstupem všech provedených simulací a měření, velmi názorně ukazuje to, co bylo v předchozích grafech víceméně skryto, totiž skutečné absolutní rozdíly mezi celkovými ztrátami jednotlivých tlumivek.

Je z něho zřejmé, že nejlepší tlumivka KOOL M μ (70 μ H na jádře průměru 20 mm) má celkové ztráty asi 0,9 W, zatímco železoprachová tlumivka téže velikosti a téže indukčnosti má ztráty kolem 2 W. Železoprachová tlumivka indukčnosti 330 μ H, navinutá na stejně velkém jádře poněkud slabším vodičem, má pak ztráty dokonce 5 W. O důsledcích pro ohřev tlumivky měniče jistě netřeba hovořit.

Dobře patrný je též posuv skupiny tlumivek s jádry KOOL M μ (černé značky) vůči skupině tlumivek s jádrem železoprachovým (žluté značky), a to podle očekávání směrem k počátku souřadnic, tedy ve směru nižších ztrát.

Ve snaze zjistit, jak blízko se lze s kovovými práškovými jádry přiblížit ideální tlumivce, byla bez ohledu na velikost jádra a pracnost vinutí dodatečně navržena a proměřena velmi kvalitní tlumivka 70 μ H s jádrem MPP 125. Z obr. 3 až obr. 5, v nichž je tato tlumivka znázorněna modrou značkou, lze usoudit, že tlumivka má celkové ztráty kolem 0,5 W a měnič s ní dosahuje účinnosti jen o 1 % nižší než teoretické.

Závěr

U měniče s požadavkem malého zvlnění výstupního napětí, tedy při aplikaci tlumivky relativně velké indukčnosti, může být snaha o dosažení špičkové účinnosti negována nezanedbatelným odporem vinutí. Ten může být zodpovědný za výrazně převažující složku celkových ztrát tlumivky, takže pokus zlepšit účinnost měniče tlumivkou s kvalitnějším (= dražším) jádrem v tomto případě nepovede k výraznějším výsledkům. Správnou cestou bude snížení odporu vinutí, tedy použití vodiče většího efektivního průřezu a tudíž obvykle i jádra větších rozměrů.

Naopak u měniče s požadavkem maximální účinnosti by měl být návrh tlumivky veden směrem k nižší indukčnosti. Jedině za předpokladu dostatečně nízkého odporu vinutí se totiž mohou naplno projevit vlastnosti feromagnetického jádra a má tedy smysl uvažovat o použití kvalitnějšího materiálu. Lepší účinnost měniče je ovšem vykoupena větším zvlněním proudu tlumivkou a tím i výstupního napětí, což může případně prodražit výstupní filtr.

Výsledky teoretických výpočtů a provedených měření prokázaly, že návrh tlumivky optimálních parametrů není triviální záležitostí. Je sice pravda, že měnič bude s trochu „slušnou“ tlumivkou pracovat téměř vždy a ani jeho účinnost nemusí být špatná – je-li však požadavkem dosažení co nejlepších parametrů, nelze se bez matematiky a fyziky obejít.

Zcela závěrem několik poznámek k zapojení měniče pro ty, kteří by jej případně chtěli prakticky využít. Protože záměrně nebyly použity jakékoliv zpětnovazební a ochranné obvody, je výstupní napětí měniče závislé na napětí napájecím a lze také očekávat, že přetížení či naopak přílišné odlehčení výstupu by měnič asi dlouho nepřežil. Při konstantním napájecím napětí je však výstupní napětí měniče i bez stabilizace až překvapivě tvrdé – z obr. 7 vyplývá vnitřní odpor asi 1 Ω . Fotografie realizovaného vzorku, osazená tlumivkou 70 μ H s jádrem KOOL M μ průměru 20 mm, je na obr. 8.

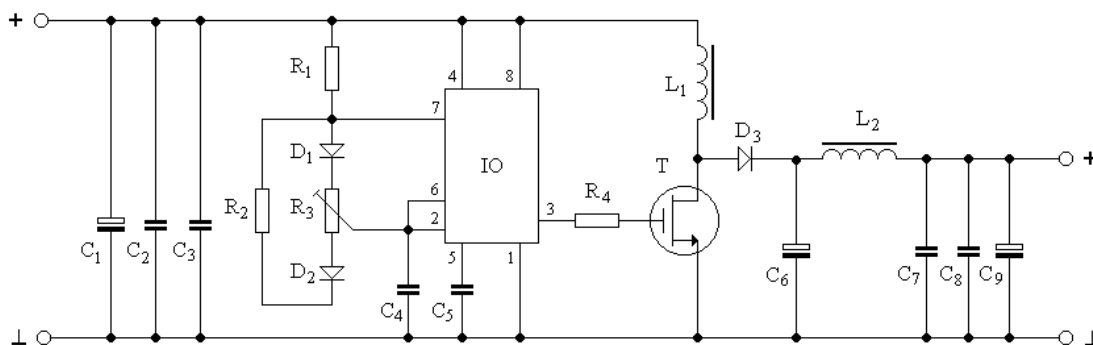
Rozpiska součástek

C ₁	2200 μF / 16 V elektrolytický kondenzátor
C ₂ , C ₈	470 nF polyesterový či podobný foliový kondenzátor s nízkým ESR
C ₃ , C ₅ , C ₇	22 nF keramický kondenzátor
C ₄	12 pF keramický kondenzátor
C ₆ , C ₉	1000 μF / 35 V elektrolytický kondenzátor
R ₁ , R ₂	1 kΩ miniaturní metalizovaný rezistor
R ₃	100 kΩ cermetový odporový trimr
R ₄	150 Ω miniaturní metalizovaný rezistor
IO	TS555CN (CMOS provedení časovače, může však být i běžný NE555)
T	BUZ11 či podobný MOSFET (při větším výkonu nutno chladič)
L ₁	viz text
L ₂	filtrační tlumivka jednotky až desítky μH s nízkým R _{DC} , např. válcová P MEC 525/S 5u6
D ₁ , D ₂	univerzální miniaturní křemíková dioda
D ₃	1N5822 Schottkyho dioda

Literatura

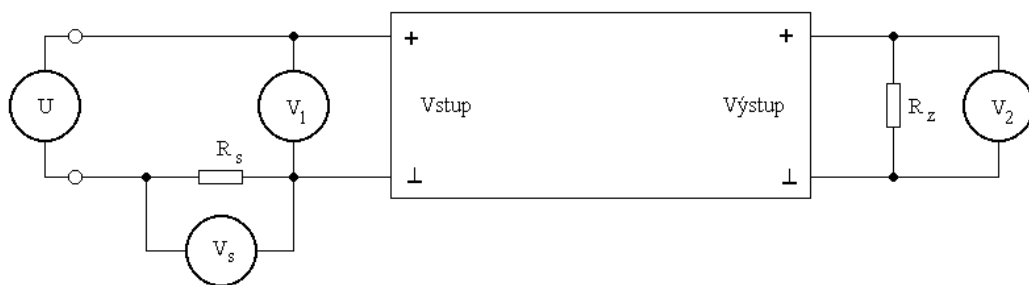
- [1] Jansa J. ing, Jansa J. DiS : Tlumivky s práškovými jádry pro spínané zdroje. PE AR 1/2004
- [2] Internetové stránky www.pmec.cz

Obr.1



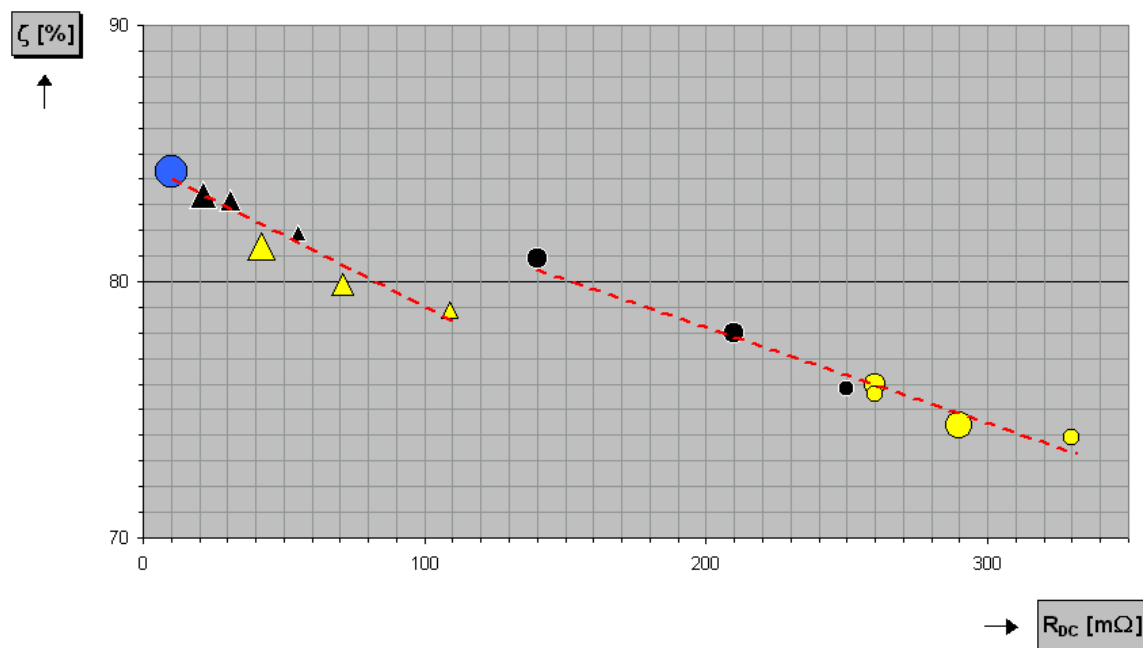
Obr. 1

Obr. 2

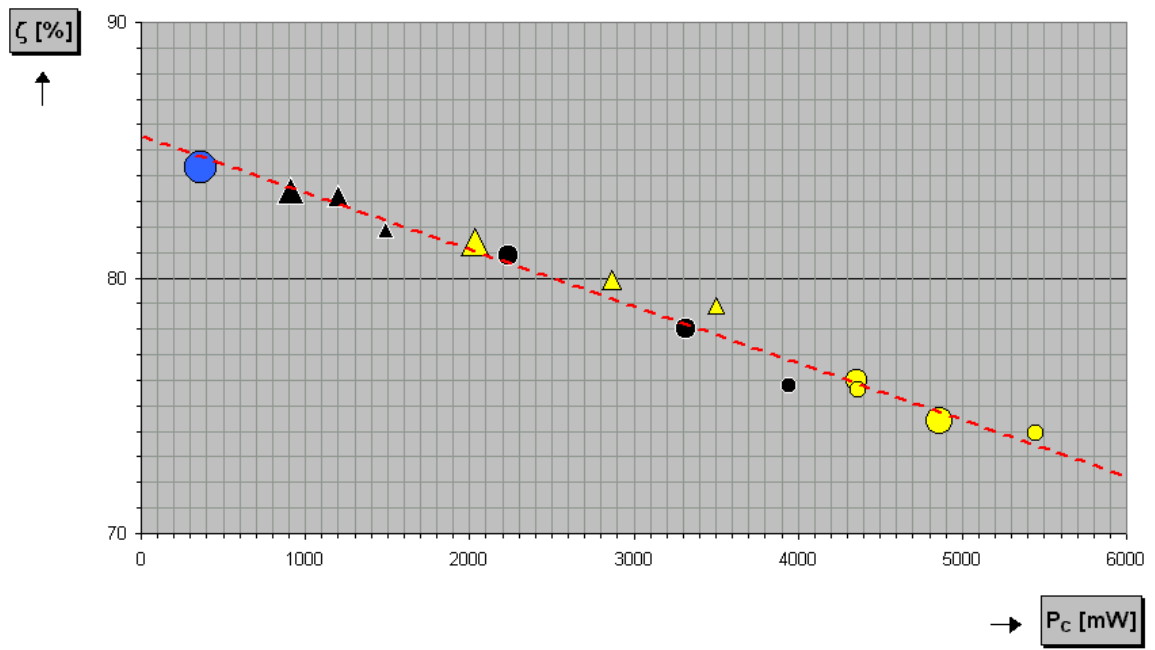


Obr. 2

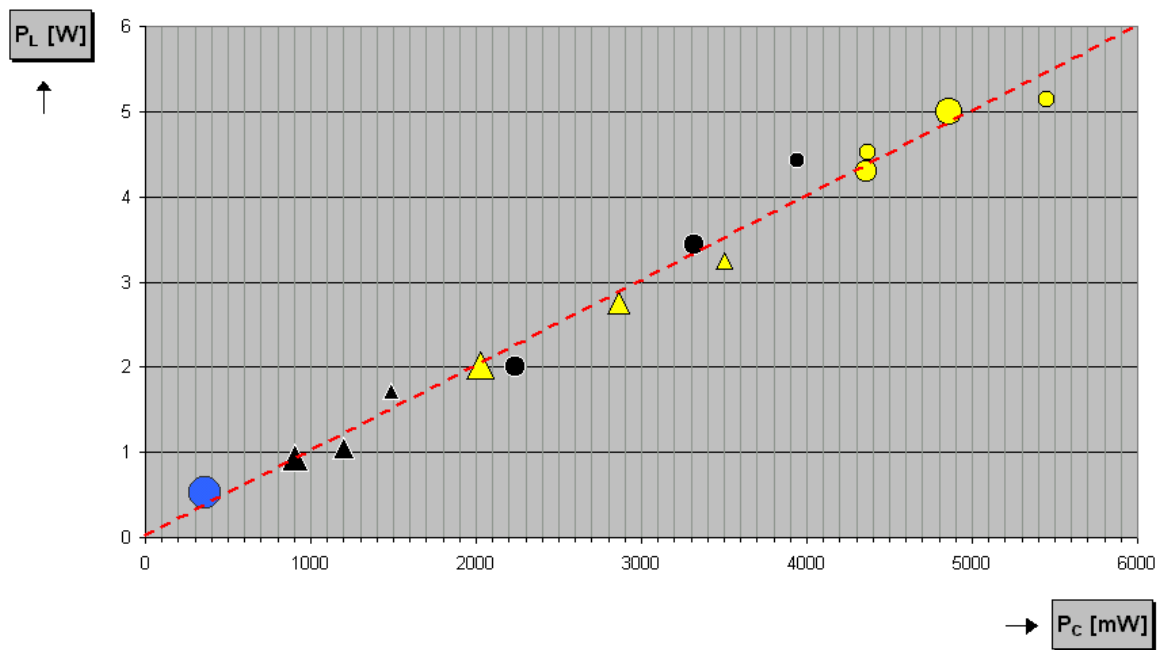
Obr. 3



Obr. 4



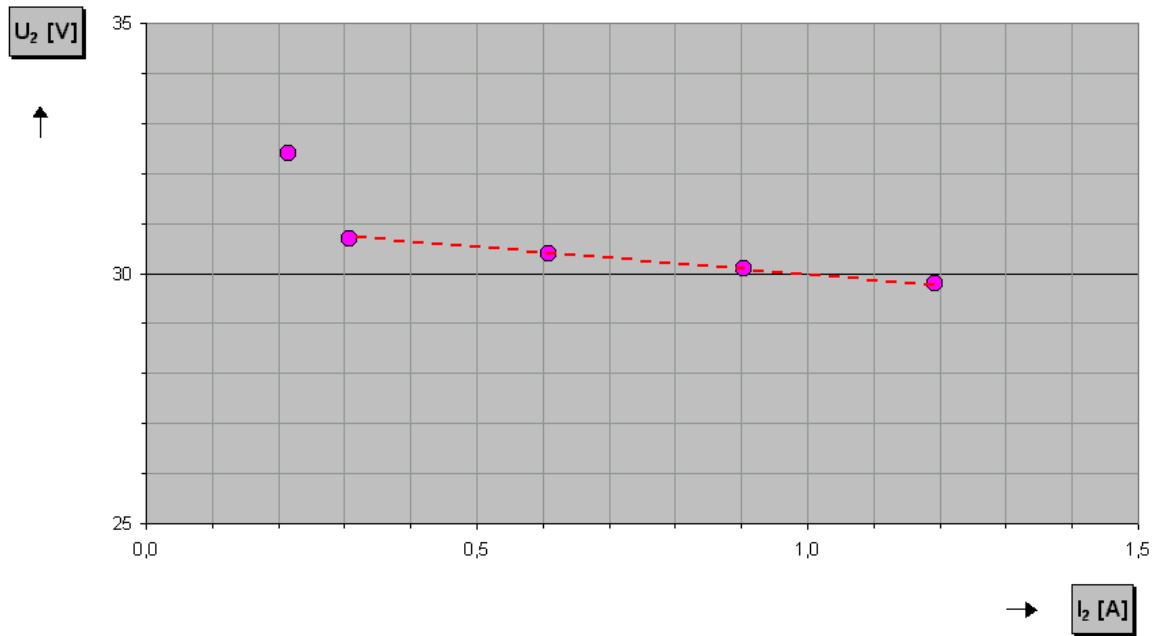
Obr. 5



Obr. 6

- 330 uH železoprachové jádro 12 mm
- 330 uH železoprachové jádro 16 mm
- 330 uH železoprachové jádro 20 mm
- 330 uH KOOL Mu jádro 12 mm
- 330 uH KOOL Mu jádro 16 mm
- ▲ 70 uH železoprachové jádro 12 mm
- ▲ 70 uH železoprachové jádro 16 mm
- ▲ 70 uH železoprachové jádro 20 mm
- ▲ 70 uH KOOL Mu jádro 12 mm
- ▲ 70 uH KOOL Mu jádro 16 mm
- ▲ 70 uH KOOL Mu jádro 20 mm
- 70 uH MPP jádro 25 mm

Obr. 7



Obr. 8

